

ย่านทดสอบสายอากาศชนิดสนามใกล้เชิงระนาบ

นาย อนล ศาสตร์ี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-639-196-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17885632

PLANAR NEAR-FIELD ANTENNA TEST RANGE

Mr. Anon Sastri

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic year 1997

ISBN 974-639-196-8

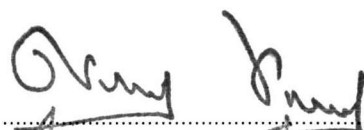
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ย่านทดสอบสายอากาศชนิดสนามใกล้เชิงระนาบ

โดย นายอนล ศาสตรี

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า


อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. ฉัตรชัย ไวยพัฒน์กร

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยพัฒน์กร)


..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

อนล ศาสตรี : ย่านทดสอบสายอากาศชนิดสนามใกล้เชิงระนาบ (Planar near-field antenna test range)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒน์กร, 109 หน้า. ISBN 974-639-196-8

การทดสอบสายอากาศในย่านทดสอบชนิดสนามใกล้เชิงระนาบเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันวิธีหนึ่ง เนื่องจากจุดเด่นประการสำคัญคือสามารถทำการวัดและทดสอบสายอากาศที่มีขนาดทางไฟฟ้าใหญ่ ซึ่งไม่สะดวกหรือเป็นไปได้ที่จะวัดในย่านสนามไกลเนื่องจากระยะสนามไกลมีค่ามากเช่น สายอากาศอาร์เรย์ซึ่งมีจำนวนอิลิเมนต์มาก และสายอากาศแบบจานสะท้อนคลื่น

ในย่านทดสอบชนิดสนามใกล้เชิงระนาบนั้นมีปัจจัยหลายประการที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างระนาบช่องเปิดและระนาบการกวาดวัดเพื่อที่จะสามารถละลายผลกระทบจากคลื่นที่จางหายไป แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลของหัววัดที่ใช้ในการกวาดวัดเพื่อนำไปใช้ในการชดเชยผลจากหัววัด และผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของหัววัด เพื่อให้สามารถคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลได้อย่างถูกต้อง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของคลื่นที่จางหายไปซึ่งมีต่อสมรรถนะของย่านทดสอบสายอากาศชนิดสนามใกล้เชิงระนาบ รวมทั้งระยะห่างที่เหมาะสมของระนาบการกวาดวัดจากระนาบช่องเปิดของสายอากาศทดสอบ ศึกษาผลกระทบเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของหัววัดและการชดเชย และศึกษาผลกระทบของความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งของหัววัดในการกวาดวัดค่า

จากผลการวิจัยโดยการคำนวณจำลองสถานการณ์พบว่าในกรณีที่ใช้ระยะการชักตัวอย่างบนระนาบการกวาดวัดเป็นครึ่งความยาวคลื่นหรือน้อยกว่านั้น ผลกระทบจากคลื่นที่จางหายไปต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลมีไม่มากนักเมื่อระยะห่างของระนาบการกวาดวัดจากระนาบช่องเปิดเป็นหนึ่งความยาวคลื่น ส่วนผลกระทบของความไม่เป็นอุดมคติของหัววัดต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลนั้นมีน้อยสำหรับช่วงค่า θ ไม่ใหญ่สาเหตุหนึ่งเนื่องจากในกรณีนี้หัววัดที่ใช้เป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมปลายเปิดซึ่งมีแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลใกล้เคียงไอโซโทรปิกในช่วงที่ θ มีค่าไม่มาก ส่วนผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งหัววัดในแนวที่อยู่บนระนาบการกวาดวัดจะมีต่อพู่ซ้างที่อยู่ห่างออกไป แต่ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนในแนวแกนจะมีมากกว่าเมื่อใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะผิดพลาดเท่ากัน

สำหรับผลการทดลองนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่คำนวณได้จากข้อมูลค่าสนามไฟฟ้าที่กวาดวัดได้บนระนาบการกวาดวัด เหมือนกับแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกล ที่คำนวณได้จากทฤษฎีเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตเฉพาะบริเวณพหุคลื่นหลักเท่านั้นเนื่องมาจากผลกระทบของสภาพแวดล้อมรวมทั้งโครงของตัวกวาดวัดซึ่งเป็นโลหะ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิติต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C815392 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: NEAR-FIELD ANTENNA MEASUREMENT / PROBE CORRECTION / PROBE
POSITIONING ERROR
ANON SASTRI : PLANAR NEAR-FIELD ANTENNA TEST RANGE.
THESIS ADVISOR : CHATCHAI WAIYAPATTANAKORN, Ph.D.
109 pp. ISBN 974-639-196-8.

THE PLANAR NEAR-FIELD ANTENNA MEASUREMENTS IS A USEFUL METHOD BECAUSE IT'S MAIN ADVANTAGE THAT MEASUREMENT OF LARGE ELECTRICAL ANTENNA, SUCH AS LARGE ARRAY ANTENNA AND REFLECTOR ANTENNA, WHICH NOT CONVENIENT OR IMPOSSIBLE TO MEASURE IN FAR FIELD BECAUSE IT REQUIRES VERY LONG DISTANCE.

IN PLANAR NEAR-FIELD ANTENNA TEST RANGE, IT HAS MANY IMPORTANT FACTORS THAT MUST CONSIDER. THESE FACTORS ARE APPROPRIATE DISTANCE BETWEEN SCAN PLANE AND APERTURE PLANE OF ANTENNA UNDER TEST WHICH CAN NEGLECT THE EFFECT OF EVANESCENT WAVE, THE FAR FIELD PATTERN OF THE SCANNING PROBE WHICH USE TO COMPENSATE THE EFFECT OF NON-IDEAL PROBE AND THE EFFECT OF PROBE POSITIONING ERROR. BY CONSIDERATION OF THESE FACTOR, THE CALCULATED FARFIELD PATTERN HAS MORE ACCURACY.

THE OBJECTIVE OF THIS RESEARCH IS TO STUDY THE EFFECT OF EVANESCENT WAVE TO DETERMINE THE APPROPRIATE DISTANCE BETWEEN SCAN PLANE AND APERTURE PLANE, THE EFFECT OF NON-IDEAL PROBE AND THE EFFECT OF PROBE POSITIONING ERROR.

BY SIMULATION, IT FINDS THAT FOR SAMPLING DISTANCE OF HALF WAVELENGTH OR LESS THAN, THE EFFECT OF EVANESCENT WAVE ON FAR FIELD PATTERN IS NEGLIGIBLE IF THE DISTANCE BETWEEN SCAN PLANE AND APERTURE PLANE IS ONE WAVELENGTH. THE EFFECT OF NON-IDEAL PROBE IS ALSO NEGLIGIBLE FOR SMALL θ ANGLE BECAUSE PROBE HAS FAR FIELD PATTERN THAT IS NOT DIFFER SO MUCH FROM ISOTROPIC FOR SMALL θ ANGLE. AND THE EFFECT OF PROBE POSITIONING ERROR FOR OFF-AXIS ERROR CASE IS ONLY TO THE FAR SIDELOBES BUT THE EFFECT IS GREATER FOR AN ON-AXIS ERROR CASE BY USE THE SAME STANDARD DEVIATION OF ERROR DISTANCE.

FINALLY, THE MEASUREMENT HAVE DONE FOR PARABOLIC REFLECTOR ANTENNA. THE CALCULATED FAR FIELD PATTERN IN E-PLANE AND H-PLANE FROM MEASUREMENT DATA IS CORRESPONDING TO THAT CALCULATE FROM GEOMETRICAL THEORY OF DIFFRACTION ONLY FOR MAIN LOBE BECAUSE OF THE COULPING FROM ENVIRONMENT AND THE METAL STRUCTURE OF SCANNER.

ภาควิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา..... วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา..... 2540

ลายมือชื่อนิติ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบหัวข้อวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณพี่ ๆ น้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการพื้นฐานไฟฟ้าสื่อสารที่ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการทำวิจัย ขอขอบคุณ นายปราโมทย์ จางอิสระกุล ที่ได้ช่วยผู้วิจัยในการทดลอง และขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้ความสนับสนุนทางการเงินบางส่วนกับงานวิจัยนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
แนวเหตุผล	1
การทดสอบสายอากาศด้วยย่านทดสอบสายอากาศชนิดสนามใกล้	2
ประเภทของการกวาดวัดค่าในย่านสนามใกล้	2
1. การกวาดวัดค่าบนระนาบ (planar scanning)	3
2. การกวาดวัดค่าบนทรงกระบอก (cylindrical scanning)	3
3. การกวาดวัดค่าบนระนาบเชิงขั้ว (plane-polar scanning)	4
4. การกวาดวัดค่าบนผิวทรงกลม (spherical scanning)	5
ประวัติการพัฒนาย่านทดสอบสนามใกล้	5
1. ระยะเริ่มต้นที่ไม่มีทำการชดเชยหัววัด	5
2. ระยะที่เริ่มมีทฤษฎีการชดเชยหัววัด	6
3. ระยะนำทฤษฎีไปสู่การปฏิบัติ	7
4. ระยะการถ่ายทอดเทคโนโลยี	7
วัตถุประสงค์	8
ขอบเขตของโครงการวิทยานิพนธ์	8
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	9
ประโยชน์	9
บทที่ 2 หลักการทั่วไปและผลกระทบจากคลื่นที่จางหายไปกับระยะห่างในการชักตัวอย่าง	
เมื่อทำการกวาดวัดค่า	10
หลักการของย่านทดสอบสายอากาศชนิดสนามใกล้เชิงระนาบ	10
แนวคิดสเปกตรัมคลื่นระนาบ	11

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมคลื่นระนาบกับแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกล	13
คลื่นที่จางหายไป (Evanescent Wave)	14
ผลกระทบจากคลื่นที่จางหายไปกับระยะห่างในการชักตัวอย่างบนระนาบการกวาดวัด	16
ผลกระทบของคลื่นที่จางหายไปต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลเมื่อใช้ ระยะห่างในการชักตัวอย่างเป็นครึ่งความยาวคลื่น	21
การใช้ฟิลเตอร์กรองข้อมูลสนามไฟฟ้าที่กวาดวัดค่าได้เพื่อลดปริมาณข้อมูล ในการประมวลผล	28
การหาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (directivity) โดยใช้ข้อมูลสนามไฟฟ้าจากการ กวาดวัดในย่านทดสอบชนิดสนามใกล้เชิงระนาบ	28
บทที่ 3 ผลกระทบเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของหัววัดและผลกระทบเนื่องจาก	
ความคลาดเคลื่อนในตำแหน่งที่กวาดวัดค่า	32
ผลกระทบเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของหัววัด	32
การหาแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลของหัววัด	46
1. หลักการของฮอยเกน (Huygen's principle)	47
2. แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลของหัววัดชนิดท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมปลายเปิด ..	52
การคำนวณจำลองสถานการณ์เพื่อดูผลกระทบเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของหัววัด	57
ผลกระทบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนในตำแหน่งที่กวาดวัดค่า	62
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	70
รายละเอียดในการทดลอง	70
ผลการทดลอง	74
วิจารณ์ผลการทดลอง	87
บทที่ 5 บทสรุป	90
สรุปผลการวิจัย	90
ข้อเสนอแนะ	91
รายการอ้างอิง	92
ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์เวกเตอร์	95

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข. ทฤษฎีการชักตัวอย่าง	98
ทฤษฎีการชักตัวอย่างของไนควิสต์	98
สเปกตรัมคลื่นระนาบในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์ของข้อมูลชักตัวอย่างสนามไฟฟ้า บนระนาบการกวาดวัด	101
ภาคผนวก ค. ทฤษฎีทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง	103
ทฤษฎีบทภาวะย้อนกลับของลอเรนซ์	103
ทฤษฎีสมมูลเชิงพื้นผิว (surface equivalence theorem)	104
ภาคผนวก ง. การหาความสัมพันธ์ระหว่างแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลกับ สเปกตรัมคลื่นระนาบ	106
ประวัติผู้เขียน	109

สารบัญรูป

รูป	หน้า
1.1	ย่านทดสอบสนามไกล สายอากาศทดสอบใช้เป็นสายอากาศรับและตั้งอยู่บนแท่นที่สามารถหมุนได้รอบทิศทาง ระยะสนามไกลโดยทั่วไปเป็นระยะที่ทำให้คลื่นที่มาถึงสายอากาศทดสอบเป็นคลื่นระนาบ 1
1.2	ก. การกวาดวัดค่าบนระนาบ สายอากาศทดสอบอยู่หนึ่ง แต่หัววัดต้องเคลื่อนที่ 2 มิติ ข. พื้นผิวสมมติที่หัววัดกวาดวัดค่าจะเป็นระนาบระบบพิกัดฉาก 2
1.3	ก. การกวาดวัดค่าบนทรงกระบอก สายอากาศทดสอบสามารถหมุนได้รอบทิศทางในแนวระดับ หัววัดเคลื่อนที่เพียงมิติเดียว ข. พื้นผิวสมมติที่หัววัดกวาดวัดค่าจะเป็นทรงกระบอก 3
1.4	ก. การกวาดวัดค่าบนระนาบแบบพิกัดเชิงขั้ว สายอากาศทดสอบสามารถหมุนได้รอบทิศทางในแนวตามรูป หัววัดเคลื่อนที่เพียงมิติเดียวซึ่งจะเป็นทิศตามแนวรัศมีของรูป ข. ข. พื้นผิวสมมติที่หัววัดกวาดวัดค่าจะเป็นระนาบพิกัดเชิงขั้ว 4
1.5	ก. การกวาดวัดค่าบนทรงกลม สายอากาศทดสอบสามารถหมุนได้รอบทิศทางในแนวระดับรวมทั้งสามารถปรับมุมเงยได้ตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศา ส่วนหัววัดจะอยู่หนึ่ง ข. พื้นผิวสมมติที่หัววัดกวาดวัดค่าจะเป็นทรงกลม 4
2.1	หลักการของย่านทดสอบสายอากาศชนิดสนามไกลเชิงระนาบ พารามิเตอร์ที่สำคัญคือระยะห่าง z_r ระหว่างระนาบช่องเปิดและระนาบการกวาดวัด กับระยะห่างในการชักตัวอย่างบนระนาบการกวาดวัด $\Delta x, \Delta y$ 10
2.2	ลักษณะทางกายภาพของคลื่นที่จางหายไป 15
2.3	บริเวณแบนโดเมน (k_x, k_y) ของโมดคลื่นระนาบเอกรูป โมดคลื่นที่จางหายไปที่ไม่เป็นปัญหาและโมดคลื่นที่จางหายไปที่เป็นปัญหาและต้องการให้ถูกลดทอนจนไม่มีผลต่อสนามไฟฟ้าบนระนาบการกวาดวัด 18
2.4	ความสัมพันธ์ในหน่วยความยาวคลื่นของระยะห่างระหว่างจุดชักตัวอย่างบนระนาบการกวาดวัด $(\Delta s / \lambda)$ กับระยะห่างของระนาบการกวาดวัดจากระนาบช่องเปิดของสายอากาศทดสอบ (N) โดยที่ตัวเลขกำกับแต่ละเส้นคือค่าต่ำสุดของการลดทอนของคลื่นที่จางหายไปโมดที่ไม่ต้องการ ($atten_{min}$) ในหน่วย dB 19

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
2.5 การกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมเอกรูป (uniform rectangular) โดยที่สนามไฟฟ้ามีโพลาริเซชันในแนวแกน y	22
2.6 ผลกระทบของคลื่นที่จางหายไปต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อการกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดเป็นแบบสี่เหลี่ยมเอกรูป โดยที่ $\Delta s = \lambda/2$ และ $z, = 1\lambda$	22
2.7 ผลกระทบของคลื่นที่จางหายไปต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อการกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดเป็นแบบสี่เหลี่ยมเอกรูป โดยที่ $\Delta s = \lambda/2$ และ $z, = 1\lambda$	23
2.8 การกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดแบบวงกลมเอกรูป (uniform circular) โดยที่สนามไฟฟ้ามีโพลาริเซชันในแนวแกน y	23
2.9 ผลกระทบของคลื่นที่จางหายไปต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อการกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดเป็นแบบวงกลมเอกรูป โดยที่ $\Delta s = \lambda/2$ และ $z, = 1\lambda$	24
2.10 ผลกระทบของคลื่นที่จางหายไปต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อการกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดเป็นแบบวงกลมเอกรูป โดยที่ $\Delta s = \lambda/2$ และ $z, = 1\lambda$	24
2.11 การกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดแบบวงกลมความรียาวพาราโบลิก (circular parabolic taper) โดยที่สนามไฟฟ้ามีโพลาริเซชันในแนวแกน y	25
2.12 ผลกระทบของคลื่นที่จางหายไปต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อการกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดเป็นแบบวงกลมความรียาวพาราโบลิก โดยที่ $\Delta s = \lambda/2$ และ $z, = 1\lambda$	25
2.13 ผลกระทบของคลื่นที่จางหายไปต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อการกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดเป็นแบบวงกลมความรียาวพาราโบลิกโดยที่ $\Delta s = \lambda/2$ และ $z, = 1\lambda$	26
3.1 นิยามของมุมในพิกัดทรงกลมที่ใช้ในที่นี้	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.2	เส้นประแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลของหัววัด ตามรูปหัววัดจะตอบสนองต่อคลื่นระนาบที่มีทิศการเคลื่อนที่ \bar{k}_1 มากกว่าคลื่นระนาบที่มีทิศการเคลื่อนที่ \bar{k}_2, \bar{k}_3 และไม่ตอบสนองต่อคลื่นระนาบที่มีทิศการเคลื่อนที่ \bar{k}_4 33
3.3	ตำแหน่งของสายอากาศทดสอบ หัววัด ระนาบอนันต์ S_0 และพื้นผิว S_∞ 34
3.4	เมื่อรู้ว่าเวกเตอร์ $\bar{k}' = -\bar{k}$ จะเห็นได้ว่ามุม $\theta' = \theta$ และมุม $\phi' = -\phi$ โดยที่เส้นประเป็นภาพฉายของ \bar{k} และ \bar{k}' บนระนาบ xy 42
3.5	ก. เมื่อรู้ว่า $\hat{r}' = -\hat{r}$ และมุม $\phi' = -\phi$ จะเห็นได้ว่าเวกเตอร์หน่วย $\hat{\phi}' = -\hat{\phi}$ 42
	ข. เมื่อรู้ว่า $\hat{r}' = -\hat{r}$ และมุม $\theta' = \theta$ จะเห็นได้ว่าเวกเตอร์หน่วย $\hat{\theta}' = \hat{\theta}$ 43
3.6	การวางตัวของหัววัดแบบโพลาริเซชันแนวตั้ง V กับแบบโพลาริเซชันแนวระดับ H 44
3.7	ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่น จุด P และอีลิเมนต์ dS บนพื้นผิวปิด S 47
3.8	การวางตัวของเอิร์ตเซียนไดโพลยาว dI ที่จุด P โดยที่ \hat{l} เป็นเวกเตอร์หน่วยในทิศทางขนานกับผิวด้านข้างของไดโพลดังรูป 48
3.9	การวางตัวของสายอากาศที่อนาคลีนสี่เหลี่ยมปลายเปิด พื้นผิวปิด S ที่ล้อมรอบมัน ประกอบด้วยระนาบ xy ซึ่งเป็นระนาบช่องเปิดและครึ่งทรงกลมรัศมีอนันต์ 52
3.10	ผลกระทบของความไม่เป็นอุดมคติของหัววัดต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อการกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดเป็นดังรูป 2.6 58
3.11	ผลกระทบของความไม่เป็นอุดมคติของหัววัดต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อการกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดเป็นดังรูป 2.6 59
3.12	ผลกระทบของความไม่เป็นอุดมคติของหัววัดต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อการกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดเป็นดังรูป 2.9 59
3.13	ผลกระทบของความไม่เป็นอุดมคติของหัววัดต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อการกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดเป็นดังรูป 2.9 60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.14 ผลกระทบของความไม่เป็นอุดมคติของหัววัดต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลใน ระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อการกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดเป็นดังรูป 2.12	60
3.15 ผลกระทบของความไม่เป็นอุดมคติของหัววัดต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลใน ระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อการกระจายของสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดเป็นดังรูป 2.12	61
3.16 ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งหัววัดในแนวที่อยู่บนระนาบการกวาดวัด ต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อ $SD = 0.05\lambda$	63
3.17 ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งหัววัดในแนวที่อยู่บนระนาบการกวาดวัด ต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อ $SD = 0.05\lambda$	63
3.18 ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งหัววัดในแนวที่อยู่บนระนาบการกวาดวัด ต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อ $SD = 0.1\lambda$	64
3.19 ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งหัววัดในแนวที่อยู่บนระนาบการกวาดวัด ต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อ $SD = 0.1\lambda$	64
3.20 ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งหัววัดในแนวที่อยู่บนระนาบการกวาดวัด ต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อ $SD = 0.2\lambda$	65
3.21 ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งหัววัดในแนวที่อยู่บนระนาบการกวาดวัด ต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อ $SD = 0.2\lambda$	65
3.22 ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนในแนวแกนต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกล ในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อ $SD = 0.05\lambda$	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.23 ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนในแนวแกนต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกล ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อ $SD = 0.05\lambda$	66
3.24 ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนในแนวแกนต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกล ในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อ $SD = 0.1\lambda$	67
3.25 ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนในแนวแกนต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกล ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อ $SD = 0.1\lambda$	67
3.26 ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนในแนวแกนต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกล ในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อ $SD = 0.2\lambda$	68
3.27 ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนในแนวแกนต่อแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกล ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อ $SD = 0.2\lambda$	68
4.1 สายอากาศทดสอบที่ใช้ในการทดลองเป็นสายอากาศจานสะท้อนแบบพาราโบลิกสมมาตร โดยที่สายอากาศป้อนคลื่นที่ใช้เป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมปลายเปิดวางไว้ที่จุดโฟกัส	70
4.2 ระบบการเก็บข้อมูลที่กวาดวัดค่าได้	71
4.3 เครื่องควบคุมการเลื่อนตำแหน่งของหัววัดแบบการควบคุมด้วยมือ	72
4.4 โครงสร้างของตัวกวาดวัด (scanner)	72
4.5 การยึดหัววัดกับแกนเคลื่อนที่ของตัวกวาดวัด ตามรูปเป็นกรณีที่หัววัดวางตัวแบบ โพลาริเซชันแนวตั้ง	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.6	การกระจายของ E_y บนระนาบการกวาดวัดที่คำนวณจากทฤษฎี GTD 74
4.7	การกระจายของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัดเมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวตั้ง (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1) 75
4.8	การกระจายของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัดเมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวระดับ (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1) 75
4.9	การกระจายของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัดเมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวตั้ง เทียบกับการกระจายของ E_y จาก GTD ที่ตำแหน่ง $x = 0$ (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1) 76
4.10	การกระจายของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัดเมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวตั้ง เทียบกับการกระจายของ E_y จาก GTD ที่ตำแหน่ง $y = 0$ (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1) 76
4.11	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้า (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1) 77
4.12	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็ก (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1) ... 77
4.13	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้า ที่ทำได้จากการกระจาย ของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัด เมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวระดับ (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1) 78
4.14	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ทำได้จากการกระจาย ของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัด เมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวระดับ (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1) 78
4.15	การกระจายของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัดเมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวตั้ง (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2) 79
4.16	การกระจายของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัดเมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวระดับ (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2) 79
4.17	การกระจายของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัดเมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวตั้ง เทียบกับการกระจายของ E_y จาก GTD ที่ตำแหน่ง $x = 0$ (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2) 80
4.18	การกระจายของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัดเมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวตั้ง เทียบกับการกระจายของ E_y จาก GTD ที่ตำแหน่ง $y = 0$ (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2) ... 80
4.19	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้า (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2) 81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.20	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็ก (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2) ... 81
4.21	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้า ที่หาได้จากการกระจาย ของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัด เมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวระดับ (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2) 82
4.22	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่หาได้จากการกระจาย ของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัด เมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวระดับ (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2) 82
4.23	การกระจายของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัดเมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวตั้ง (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 3 ในกรณีที่ไม่ได้ตั้งใจให้เกิดการผิดพลาดเชิงตำแหน่ง) 83
4.24	การกระจายของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัดเมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวระดับ (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 3 ในกรณีที่ไม่ได้ตั้งใจให้เกิดการผิดพลาดเชิงตำแหน่ง) 83
4.25	ผลต่างของการกระจายของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัด ที่ตำแหน่ง $x = 0$ เนื่องจาก ความผิดพลาดเชิงตำแหน่ง ที่ตั้งใจให้เกิดขึ้น (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 3 เมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวตั้ง) 84
4.26	ผลต่างของการกระจายของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัด ที่ตำแหน่ง $y = 0$ เนื่องจาก ความผิดพลาดเชิงตำแหน่ง ที่ตั้งใจให้เกิดขึ้น (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 3 เมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวตั้ง) 84
4.27	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้า ที่หาได้จากการกระจาย ของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัด เมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวตั้ง (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 3) 85
4.28	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่หาได้จากการกระจาย ของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัด เมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวตั้ง (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 3) 85
4.29	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้า ที่หาได้จากการกระจาย ของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัด เมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวระดับ (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 3) 86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
4.30	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็ก ที่ทำได้จากการกระจายของค่าวัดบนระนาบการกวาดวัด เมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวระดับ (ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 3)	86
ค.1	การแทนแหล่งกำเนิดคลื่นภายในพื้นผิว S ตามรูป (ก) ด้วยแหล่งกระแสสมมูลบนพื้นผิว S ดังรูป (ข)	104

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
\bar{A}	สเปกตรัมคลื่นระนาบ
A_x, A_y, A_z	องค์ประกอบของสเปกตรัมคลื่นระนาบในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ
A_θ, A_ϕ	องค์ประกอบของสเปกตรัมคลื่นระนาบในแนวแกน θ และ ϕ ตามลำดับ
\bar{k}	เวกเตอร์แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบ
k_x, k_y, k_z	องค์ประกอบของเวกเตอร์แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ
k	ค่าคงที่เลขคลื่น
k_{xm}, k_{ym}	ค่าสูงสุดของขนาดของ k_x, k_y ซึ่ง $\bar{A}(k_x, k_y)$ มีนัยสำคัญ
$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$	เวกเตอร์หน่วยในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ
$\hat{\theta}, \hat{\phi}, \hat{r}$	เวกเตอร์หน่วยในแนวแกน θ, ϕ และ r ตามลำดับ
z_i	ระยะห่างของระนาบการกวาดวัดจากระนาบช่องเปิดของสายอากาศทดสอบ
$\Delta x, \Delta y$	ระยะห่างของการชักตัวอย่างค่าสนามไฟฟ้าบนระนาบการกวาดวัดในแนวแกน x และ y ตามลำดับ
Δs	ระยะห่างของการชักตัวอย่างค่าสนามไฟฟ้าบนระนาบการกวาดวัดในกรณีนี้ $\Delta x = \Delta y$
$\alpha(k_x, k_y)$	ค่าคงที่การลดทอนของคลื่นที่จางหายไปของโหมดที่ระบุโดยค่า k_x และ k_y เมื่อขนาดของ k_x, k_y มากกว่า k
D	สภาพเจาะจงทิศทาง
P_B^V	ค่าวัดที่หัววัดกวาดวัดได้เมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวตั้ง
P_B^H	ค่าวัดที่หัววัดกวาดวัดได้เมื่อหัววัดวางตัวแบบโพลาริเซชันแนวระดับ